

PENGEMBANGAN PROTOTIPE *AUGMENTED REALITY* DAN *INTERNET OF THINGS* (AR-IOT) UNTUK PERAWATAN MESIN INDUSTRI

Agus Wagyana¹⁾, Dandun Widhiantoro²⁾, M. Reza Febrian³⁾, dan Purbo Dwi Junianto⁴⁾

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta

Jl. Prof. DR. G.A. Siwabessy, Kampus Universitas Indonesia, Depok, Indonesia, 16425

E-mail: agus.wagyana@elektro.pnj.ac.id

Abstract

Industrial machine maintenance plays an important role in ensuring continuous production. Common issues such as delayed fault detection, lack of real-time data, and reliance on technician expertise can lead to costly downtime. This study proposes a prototype system that integrates Augmented Reality (AR) and the Internet of Things (IoT), known as AR-IoT, for efficient industrial machine monitoring and control. The system is built using an ESP32 microcontroller that collects temperature, vibration, and pressure data through LM35, ADXL345, and MPS20N0040D sensors. The sensor data is transmitted via Wi-Fi to the MQTT broker (HiveMQ Cloud), and displayed in real-time through an AR interface developed with Unity and Vuforia. The interface allows users to monitor sensor data and control actuators such as relays and alarms interactively. The system also utilizes Firebase for cloud data storage. Experimental results show that the AR-IoT system functions stably and responsively, with successful integration between AR visualization and IoT-based control. The developed prototype demonstrates the potential of AR-IoT systems in improving maintenance accuracy, responsiveness, and operational efficiency in industrial settings.

Keywords: *Augmented Reality, Internet of Things, ESP32, MQTT, Industrial Maintenance*

PENDAHULUAN

Perawatan mesin industri merupakan faktor penting dalam menjaga kelangsungan proses produksi, namun sering terhambat oleh keterlambatan dalam mendeteksi kerusakan, minimnya informasi *real-time*, serta ketergantungan pada keahlian teknisi, yang berpotensi menimbulkan terhentinya operasi (*downtime*) dan kerugian besar. Perkembangan teknologi *Industry 4.0* memberikan solusi melalui integrasi *Augmented Reality* dan *Internet of Things* (AR-IoT), yang mampu memantau dan mengendalikan kondisi mesin secara *real-time* menggunakan sensor dan aktuator, serta menyajikan tampilan visual interaktif yang membantu teknisi memahami kondisi aktual serta melakukan tindakan perbaikan.

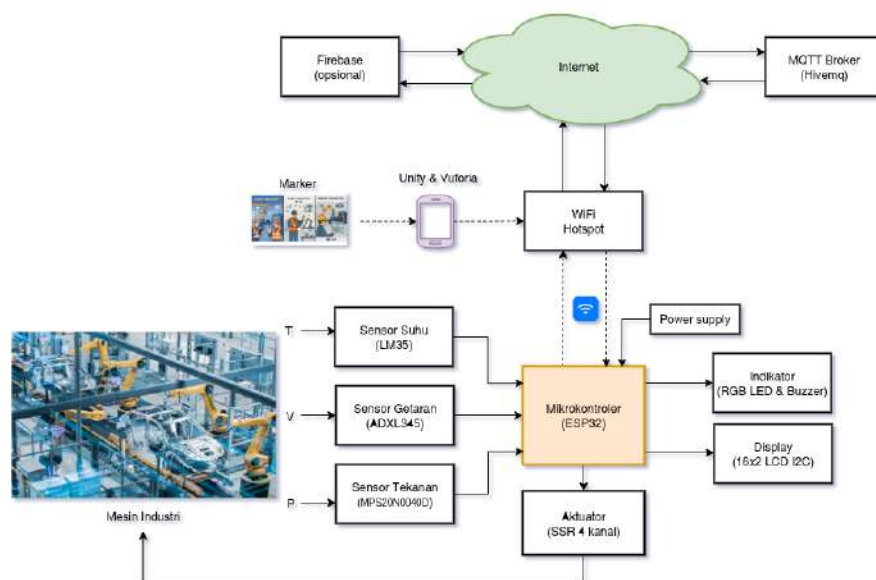
Sejumlah penelitian, diantaranya (Egger & Masood, 2019), (Mourtzis, Siatras, & Angelopoulos, 2020), (Liu et al, 2022), (Kočiško, Pollák, Konečná, Kaščák, & Svetlík, 2024), dan (Miranda et al., 2025) menunjukkan bahwa pemeliharaan mesin industri berbasis IoT serta panduan perbaikan berbasis AR dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi pemeliharaan mesin. Selain itu, AR menjadi teknologi kunci dalam integrasi manusia di *smart factory* berbasis IoT. Mendes dan Velasquez (2024) serta Breitkreuz et al. (2022) menyatakan bahwa AR menunjukkan potensi besar dan semakin berkembang sebagai teknologi pendukung

pelatihan dan asistensi di lingkungan industri yang kompleks. Sementara itu (Shyr et al, 2022) menunjukkan bahwa pendekatan AR yang dikembangkan berhasil membantu mahasiswa memahami konsep dan menerapkan teknologi AR untuk pemeliharaan dan diagnostik peralatan.

Walaupun jumlah penelitian yang mengintegrasikan AR dan IoT terus bertambah, integrasi AR dan IoT dengan sensor berbasis mikrokontroler ESP32 serta penggunaan protokol MQTT masih belum banyak diteliti. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengujian prototipe sistem pemantauan dan kendali mesin industri berbasis AR-IoT yang mengintegrasikan sensor secara *real-time* dan visualisasi interaktif untuk mendukung kegiatan pemeliharaan industri secara efisien.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi prototipe sistem monitoring dan kendali berbasis AR-IoT. Tahapannya meliputi perancangan, implementasi, dan pengujian sistem, dengan fokus pada spesifikasi teknis komponen hardware, software, antarmuka pengguna, dan komunikasi data IoT. Diagram blok sistem ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem AR-IoT

Sistem AR-IoT ini memantau suhu, getaran, dan tekanan mesin menggunakan sensor LM35, ADXL345, dan MPS20N0040D yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32. Data dikirim via WiFi ke MQTT Broker (HiveMQ Cloud) dan ditampilkan secara *real-time* dalam bentuk

Augmented Reality melalui aplikasi Unity–Vuforia (Simon, 2023). Pengguna dapat memantau dan mengontrol perangkat seperti pendingin atau alarm melalui antarmuka AR, yang terhubung kembali ke ESP32 untuk mengaktifkan LED RGB, buzzer, SSR, dan LCD. Riwayat data juga dapat disimpan di Firebase sebagai basis data *cloud*.

Pembacaan sensor pada sistem dilakukan dengan konfigurasi berbeda, yaitu sensor getaran ADXL345 di-*sampling* pada frekuensi internal 800 Hz kemudian di-*downsample* menjadi 1 Hz untuk telemetri dan dipublikasikan ke broker MQTT setiap 5 detik dalam bentuk rata-rata lima sampel guna menekan *jitter* tanpa mengorbankan respons; sensor tekanan MPS20N0040D di-*sampling* 10 Hz dan hasilnya dipublikasikan tiap 5 detik; sementara sensor suhu LM35 disampling pada 1 Hz dan dipublikasikan tiap 5 detik.

Spesifikasi dan fungsi komponen sistem diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1
Spesifikasi Hardware dan Software Sistem AR-IoT

Komponen	Spesifikasi dan Fungsi
Mikrokontroler	ESP32 board: Pusat kendali untuk membaca data sensor, mengendalikan indikator dan relay, dan mengirim/terima data melalui MQTT (HiveMQ Cloud).
Sensor	a. LM35: Mengukur suhu mesin/lingkungan (-55°C hingga +150°C) b. ADXL345: Mendeteksi getaran abnormal ($\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$) c. MPS20N0040D: Mengukur tekanan pneumatik (0 - 40kPa)
Indikator	a. RGB LED: Indikator visual untuk status mesin tidak normal b. <i>Active Buzzer</i> : Alarm suara jika terjadi anomali
Display	LCD 16x2 I2C: Menampilkan suhu, getaran, dan tekanan di lokasi industri
Aktuator	<i>Solid State Relay</i> 4-Kanal : Mengontrol perangkat pendukung (misalnya, pendingin, alarm eksternal, pompa) berdasarkan logika sistem atau perintah dari antarmuka AR
Protokol Komunikasi	MQTT - HiveMQ Cloud a. Topik pemantauan dan notifikasi: • industry/temperature – data suhu • industry/vibration – data getaran • industry/pressure – data tekanan • industry/alerts – notifikasi anomali b. Topik kontrol: • industry/control/relay1 s.d. relay4 – kontrol perangkat
Platform AR	Unity dan Vuforia a. Visualisasi AR: Menampilkan grafik suhu, tekanan, getaran secara overlay b. Kontrol Virtual: Tombol virtual untuk mengaktifkan relay c. Notifikasi Visual: Warna/ikon muncul saat deteksi anomali

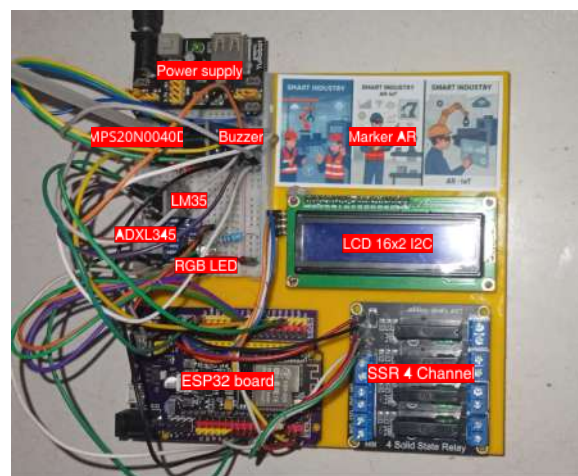
Prototipe AR-IoT menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali untuk membaca sensor, mengontrol indikator, serta berkomunikasi melalui MQTT (HiveMQ Cloud). Sensor yang digunakan: LM35 (suhu, -55–150 °C), ADXL345 (getaran, ± 2 g s.d. ± 16 g), dan MPS20N0040D (tekanan, 0–40 kPa). Hasil pembacaan ditampilkan di LCD 16×2 I²C,

sementara LED RGB dan buzzer memberi peringatan anomali. SSR 4-kanal memungkinkan kendali perangkat eksternal (pendingin, pompa, alarm).

Data dipublikasikan ke topik *industry/temperature*, *industry/vibration*, *industry/pressure*, dan *industry/alerts*, dengan kontrol pada *industry/control/relay1–relay4*. Visualisasi berbasis Unity + Vuforia menampilkan overlay AR real-time serta tombol virtual untuk kendali, dengan histori dan log tersimpan di Firebase.

Pemilihan sensor mempertimbangkan biaya, integrasi dengan ESP32, dan kecukupan performa: LM35 untuk peringatan suhu awal, ADXL345 dengan ODR tinggi dan rentang ± 4 g untuk deteksi getaran, serta MPS20N0040D untuk sistem pneumatik. Keterbatasan akurasi diatasi dengan filter median/moving average dan publikasi teragregasi tiap 5 detik.

Gambar 2 menunjukkan prototipe modul AR-IoT yang telah dirakit.

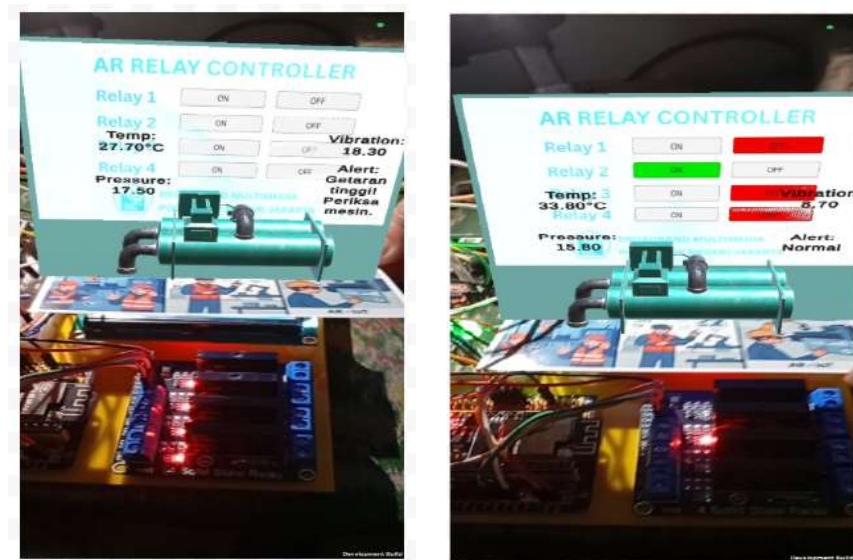


Gambar 2. Prototipe Modul AR-IoT

Tahap pengujian sistem mencakup uji fungsional untuk memastikan semua fitur AR dan IoT berjalan dengan baik, serta uji performansi menggunakan Unity Profiler untuk mengukur latensi, FPS, penggunaan CPU/GPU, dan RAM. Pengujian dilakukan secara terintegrasi selama 30–60 menit per sesi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil tampilan antarmuka aplikasi AR ketika dilihat melalui kamera *smartphone* yang diarahkan ke *marker*, diperlihatkan pada Gambar 3. Fungsi monitoring (a) menampilkan secara *real-time* nilai *temperature*, *vibration*, dan *pressure*. Sedangkan fungsi kendali (b) menyediakan *virtual button* untuk mengendalikan 4 kanal SSR secara manual.



(a) Fungsi monitoring

(b) Fungsi kendali

Gambar 3. Tampilan Antarmuka AR-IoT

a. Fungsionalitas Aplikasi AR

Hasil pengujian fungsionalitas aplikasi AR diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2
Fungsional Modul AR

No	Fitur	Hasil	Catatan
1	Deteksi Permukaan	Berhasil	Stabil di berbagai sisi, AR sulit terdeteksi jika cahaya kurang
2	Penempatan Objek 3D	Berhasil	Tidak terpengaruh oleh cahaya
3	Interaksi Objek (putar)	Berhasil	Responsif
4	Image Target Detection	Berhasil	Waktu deteksi rata-rata 1 detik

Hasil menunjukkan bahwa deteksi *marker* dan penempatan objek 3D berjalan dengan baik dan stabil di berbagai sisi, meskipun sistem mengalami penurunan performa dalam kondisi pencahayaan rendah. Objek 3D dapat diputar secara responsif, dan waktu deteksi *marker* rata-rata hanya 1 detik. Hal ini menunjukkan bahwa fitur dasar AR seperti pelacakan *marker*, penempatan objek, dan interaksi telah berjalan sesuai harapan.

b. Fungsionalitas Modul IoT

Hasil pengujian fungsionalitas modul IoT diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3
Fungsional Modul IoT

No	Fitur	Hasil	Catatan
----	-------	-------	---------

1	Koneksi ke ESP32 via MQTT	Berhasil	Delay awal ~0.5 detik
2	Pembacaan Data Suhu, Getaran, dan Tekanan (LCD)	Berhasil	<i>Update</i> setiap 5 detik
3	Kontrol Relay 1, 2, 3, dan 4	Berhasil	Respon ~5 detik
4	Indikasi Alarm / Alert	Berhasil	
5	Sinkronisasi <i>Real-Time</i>	Berhasil	
6	Handling Error Koneksi	Berhasil	Menampilkan notifikasi <i>error</i>

ESP32 terhubung ke MQTT *Broker* (HiveMQ *Cloud*) dengan sukses, dengan delay awal komunikasi sekitar 0.5 detik. Sensor suhu, getaran, dan tekanan berhasil dibaca dan diperbarui setiap 5 detik, yang kemudian ditampilkan melalui LCD 16x2. Semua relay (1–4) dapat dikendalikan dengan rata-rata waktu respon sekitar 5 detik. Selain itu, sistem berhasil memberikan notifikasi peringatan dan menangani *error* koneksi dengan baik, termasuk menampilkan notifikasi kesalahan ketika koneksi terputus.

Uji performansi IoT menunjukkan koneksi 100% stabil tanpa error maupun kehilangan data, menandakan komunikasi ESP32–MQTT–AR berjalan andal. Sistem juga dilengkapi mekanisme notifikasi saat koneksi terputus, sehingga keandalannya tetap terjaga. Dengan error mendekati 0%, prototipe AR-IoT terbukti stabil.

c. Fungsionalitas Integrasi AR dan IoT

Hasil pengujian fungsionalitas integrasi AR dan IoT diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4
Fungsional Integrasi AR dan IoT

No	Fitur	Hasil	Catatan
1	Visualisasi Data Suhu di AR	Berhasil	Ditampilkan sebagai label 3D
2	Visualisasi Data Getaran di AR	Berhasil	Ditampilkan sebagai label 3D
3	Visualisasi Data Tekanan di AR	Berhasil	Ditampilkan sebagai label 3D
4	Tombol Kontrol IoT di UI AR	Berhasil	Jika <i>marker</i> tidak terdeteksi penuh, <i>button</i> tidak bisa diklik
5	<i>Update</i> Status Otomatis	Berhasil	Setiap 5 detik

Visualisasi data suhu, getaran, dan tekanan dalam bentuk label 3D di antarmuka AR berjalan dengan baik. Pengguna dapat mengontrol perangkat melalui tombol virtual dalam antarmuka AR, meskipun fungsi tombol akan terganggu jika marker tidak terdeteksi penuh. Sistem juga berhasil memperbarui status perangkat secara otomatis setiap 5 detik.

d. Performansi AR

Hasil pengujian performansi AR dengan *Unity Profiler* diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 5
Pengujian Performansi AR

No	Parameter	Nilai Rata-Rata	Catatan
1	<i>Frame Rate</i> (FPS)	60 fps	Target $\geq$ 30 fps
2	<i>Load Time Scene</i> AR	1.5 detik	
3	<i>CPU Usage</i>	52%	
4	<i>GPU Usage</i>	33%	
5	<i>RAM Usage</i>	540 MB	Device: Redmi 14C

Pengujian menunjukkan performansi antarmuka AR dengan rata-rata *frame rate* 60 fps, *load time* sekitar 1.5 detik, penggunaan CPU 52%, GPU 33%, dan RAM 540 MB. Hasil ini menunjukkan bahwa aplikasi AR dapat dijalankan dengan lancar.

e. Performansi IoT

Hasil pengujian performansi modul IoT diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 6
Performansi IoT

No	Parameter	Nilai Rata-Rata	Catatan
1	Latensi Komunikasi	5 detik	Dari klik tombol hingga respon perangkat
2	Bandwidth Penggunaan	3 KB/detik	
3	Stabilitas Koneksi	100% stabil	
4	Konsumsi Baterai	4% per jam	Device: Redmi 14c

Sistem menunjukkan latensi komunikasi rata-rata 5 detik dari klik tombol hingga respons perangkat. *Bandwidth* penggunaan hanya sekitar 3 KB/detik, dan stabilitas koneksi terjaga 100%. Konsumsi daya juga hemat, sekitar 4% per jam saat diuji di perangkat yang sama.

6. Performansi Gabungan AR dan IoT

Hasil pengujian performansi gabungan AR dan IoT diperlihatkan pada Tabel 7.

Tabel 7
Performansi Gabungan AR dan IoT

No	Parameter	Hasil	Catatan
1	<i>Multitasking</i> AR + IoT	Stabil	
2	Beban Data Sensor	5 detik delay	
3	Lama Penggunaan Tanpa <i>Crash</i>	~1 jam	Tidak <i>Crash</i>

Dalam uji *multitasking*, sistem AR dan IoT berjalan stabil secara bersamaan tanpa *crash* hingga 1 jam penggunaan.

SIMPULAN

Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe sistem AR-IoT ini mampu menjalankan fungsi monitoring dan kontrol secara *real-time*, responsif, dan stabil, dengan tampilan antarmuka AR yang interaktif serta komunikasi data yang efisien melalui protokol MQTT. Integrasi ESP32, Unity, dan Vuforia menghasilkan antarmuka visual pemeliharaan mesin yang berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut di lingkungan industri nyata.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Politeknik Negeri Jakarta [Nomor kontrak B.264/PL3.B/PN.003/2025].

DAFTAR PUSTAKA

- Breitkreuz, D., Müller, M., Stegelmeyer, D., & Mishra, R. (2022). Augmented Reality Remote Maintenance in Industry: A Systematic Literature Review. In: De Paolis, L.T., Arpaia, P., Sacco, M. (eds) *Extended Reality. XR Salento 2022. Lecture Notes in Computer Science*, vol 13446. Springer, Cham.
- Egger, J., & Masood, T. (2019). Augmented reality in support of intelligent manufacturing – A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106195.
- Kočiško, M., Pollák, M., Konečná, S., Kaščák, J., & Svetlík, J. (2024). Integration of augmented reality and IoT elements in the maintenance 4.0. In *Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 229–239).
- Liu, C., Zhu, H., Tang, D., Nie, Q., Zhou, T., Wang, L., & Song, Y. (2022). Probing an intelligent predictive maintenance approach with deep learning and augmented reality for machine tools in IoT-enabled manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 77, 102357.
- Miranda, J., Costa, A., Romero, L., & Faria, P. M. (2025, July 25). Digital twins in industrial maintenance: Integrating virtual and augmented reality for innovation. *World Journal of Information Systems*, 2(2).
- Morales Méndez, G., & del Cerro Velázquez, F. (2024). Augmented Reality in Industry 4.0 Assistance and Training Areas: A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. *Electronics*, 13(6), 1147.
- Mourtzis, D., Siatras, V., & Angelopoulos, J. (2020). Real-Time remote maintenance support based on augmented reality (AR). *Applied Sciences*, 10(5), 1855.
- Shyr, W.-J., Tsai, C.-J., Lin, C.-M., & Liao, H.-M. (2022). Development and Assessment of Augmented Reality Technology for Using in an Equipment Maintenance and Diagnostic System. *Sustainability*, 14(19), 12154.
- Simon, J. (2023). Augmented Reality Application Development using Unity and Vuforia. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, 21(1), 69–77.